

## ОЦЕНКА СТЕПЕНИ НАГРУЖЕНИЯ МЕЖДУКАМЕРНЫХ ЦЕЛИКОВ НА УЧАСТКЕ ДЛИТЕЛЬНО ОСТАНОВЛЕННОЙ ГРАНИЦЫ ГОРНЫХ РАБОТ

П.А. Глебова

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

**Аннотация:** Для условий камерной системы разработки рассматривается отработка участка, примыкающего к длительно остановленной границе горных работ, в пределах которой реализуется деформация ранее подработанного массива. Для данного варианта отработки оценивается изменение степени нагружения междукамерных целиков в зависимости от развития процесса сдвижения. Расчеты выполнялись методом математического моделирования напряженно-деформируемого состояния подработанного массива с целью анализа распределения вертикальной нагрузки на междукамерные целики, прилегающие к остановленной границе выработанного пространства. По результатам моделирования получена усредненная оценка степени нагружения целиков и соответствующая нагрузка.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, степень нагружения, длительно остановленные границы горных работ, вертикальная нагрузка.

### Введение

Определение степени нагружения целиков, как показателя запаса их несущей способности, является неотъемлемой составляющей при выборе параметров камерной системы разработки рудника. Степень нагружения целиков зависит от действующей средней вертикальной нагрузки  $P$  и их расчетной несущей способности  $Q$  [1]:

$$C = \frac{P}{Q}.$$

Определение вертикальной нагрузки, приходящейся на междукамерные целики, включает различные методы оценки в зависимости от условий системы разработки участка [2-5].

Целью данной работы являлась оценка степени нагружения междукамерных целиков, примыкающих к длительно остановленной границе выработанного пространства путем анализа их напряженного состояния с учетом развития процесса сдвижения.

### Методы и подходы

Расчетная область (рис. 1) включала выработанное пространство (участок 1) с длительно остановленной границей горных работ. Примыкающий к границам участок 2 отрабатывался камерной системой со следующими параметрами: ширина очистных камер  $a = 6$  м, ширина междукамерных целиков  $b = 5$  м, вынимаемая мощность  $m_0 = 5.1$  м. Глубина ведения горных работ составляла  $H = 320$  м.

Определение степени нагружения целиков, находящихся в условиях полной подработки, основывалось на методике Турнера – Шевякова [6-7]:

$$C = \frac{\gamma H (a + b)}{b k_f \sigma_m},$$

где  $\gamma$  – объемный вес пород,  $k_f$  – коэффициент формы, характеризующий зависимость несущей способности от отношения ширины целиков  $b$  к их высоте  $m$ ;  $\sigma_m$  – прочность пород в массиве. Согласно расчетам, средняя нагрузка  $P$ , приходящаяся на каждый це-

лик, соответствовала значению полного веса столба пород до земной поверхности. Для принятых параметров нагрузка на каждый целик в условиях полной подработки составила 15.4 МПа, степень нагружения целиков – 0.38.

Математическое моделирование поставленной задачи проводилось в упругопластической постановке для условий плоского деформированного состояния. На боковых границах отсутствовали горизонтальные смещения, на нижней – вертикальные. В пределах рассматриваемой области задавались массовые силы интенсивностью  $\gamma$ . Численное решение осуществлялась методом конечных элементов [8]. Реализация упругопластической задачи основывалось на методе начальных напряжений [9].

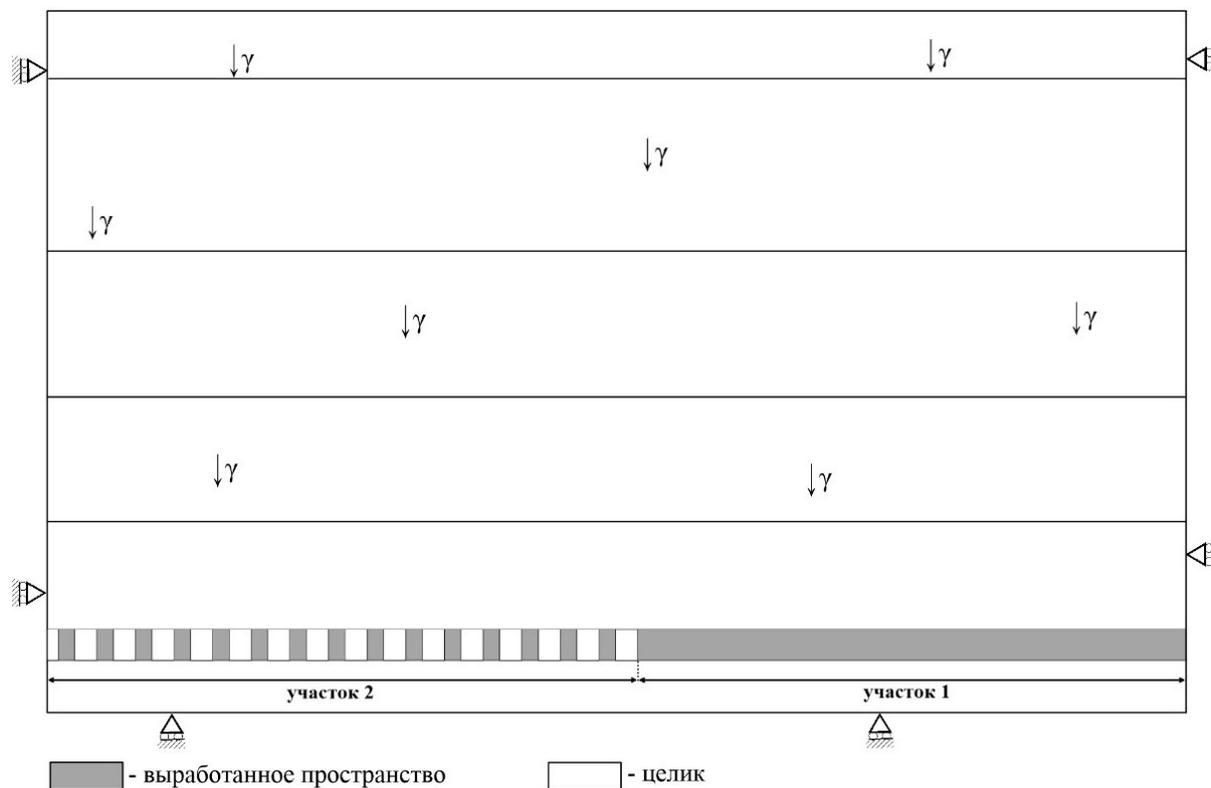


Рис. 1. Расчетная схема

Анализ изменения напряженного состояния целиков проводился по мере развития процесса сдвижения вплоть до конца достижения конечных оседаний земной поверхности в зоне полной подработки на участке 2:

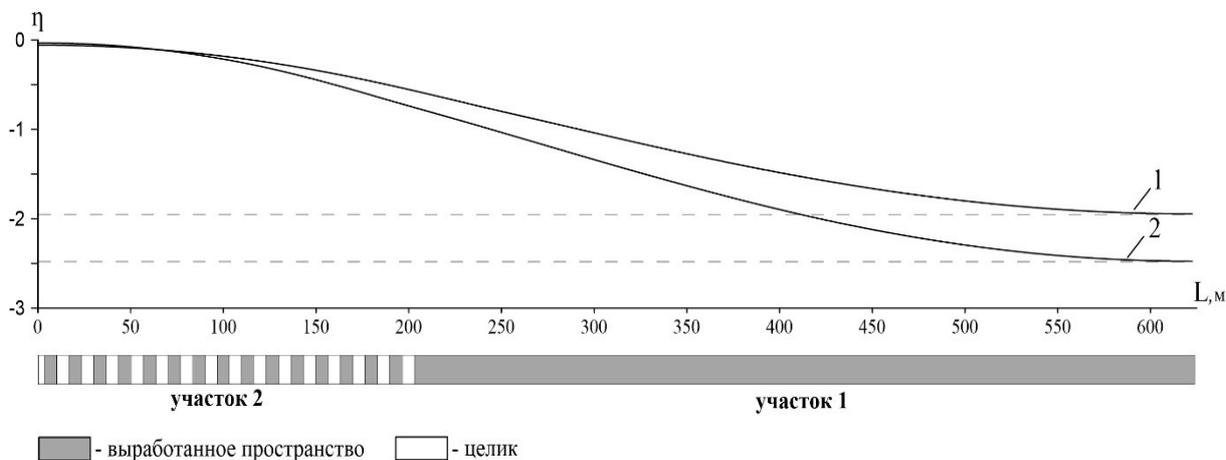
$$\eta_k = 0.9m_0\omega p,$$

где  $\omega$  – расчетный коэффициент извлечения,  $p$  – параметр, характеризующий влияние закладки очистных камер ( $p = 1$ ). В геомеханической модели подработанного массива отработанный пласт моделировался материалом с переменным модулем деформации [10]. При этом было принято, что при достижении примерно 80% от конечных оседаний на участке 1 разрушенные породы формируют отпор кровли выработанного пространства, который в модели задавался путем увеличения модуля упругости отработанного пласта. Вследствие процесса происходит разгрузка междукамерных целиков участка 2.

Средняя нагрузка, приходящаяся на целики, определялась действующими в среднем сечении целиков вертикальными напряжениями  $\sigma_y$ .

### Результаты и обсуждения

Для условий представленной задачи максимальные конечные оседания земной поверхности составляют  $\eta_k = 2.5$  м. Начало процесса разгрузки целиков предполагается на момент достижения 80% конечных оседаний земной поверхности в зоне полной подработки участка 1, где величина соответствует 2 м (рис. 2).



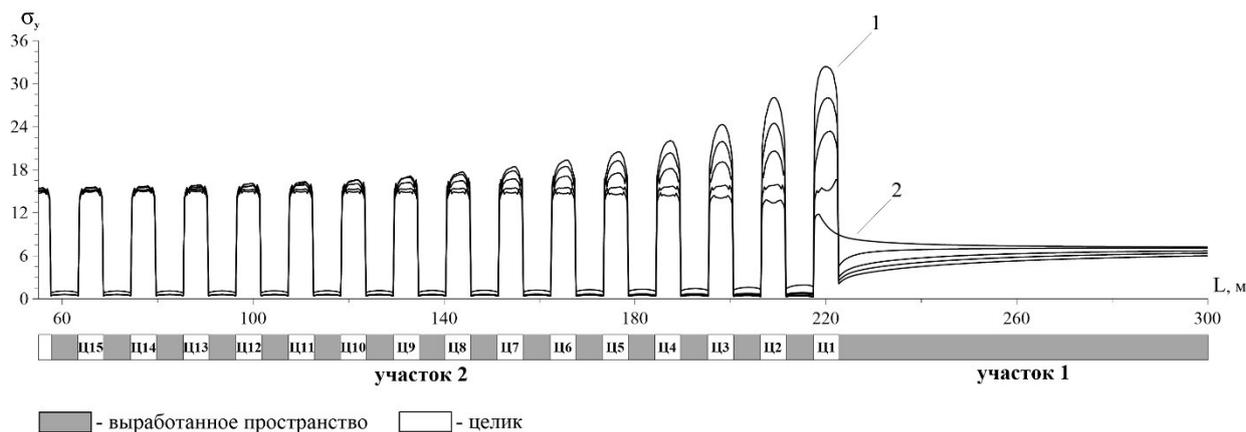
**Рис. 2.** Расчетные оседания земной поверхности:  
1 – 80% от конечных оседаний; 2 – на конец процесса сдвижения

Полученное в результате моделирования распределение вертикальной нагрузки по мере затухания процесса сдвижения представлено на рис. 3. В таблице 1 приведены значения нагрузки и соответствующая степень нагружения целиков на момент достижения 80% от конечных оседаний, то есть на момент начала действия отпора от разрушенных пород (1), и на конец процесса сдвижения (2).

Развитие процесса сдвижения до формирования отпора от разрушенных пород сопровождается ростом вертикальной нагрузки на междукамерные целики, где большую нагрузку испытывают целики, близлежащие к длительно остановленной границе горных работ. На момент достижения 80% от конечных оседаний степень нагружения ближайшего к участку 1 междукамерного целика (Ц1) увеличивается до 0.8, что почти вдвое превышает значение в условиях полной подработки.

Полученные результаты можно обобщить и принять, что повышенная нагрузка характерна для целиков, расположенных в пределах 90 м от длительно остановленной границы горных работ. При этом усредненная нагрузка, действующая на данные целики, будет составлять 21.9 МПа, что соответствует степени нагружения – 0.54. По мере отдаления от длительно остановленной границы горных работ наблюдается снижение величины действующей нагрузки. На удалении более 90 м превышение нагрузки на целики составляет максимум 10% от стандартной величины  $P = \gamma \cdot H \cdot (a + b)/b$  в зоне полной подработки.

Анализ напряженного состояния целиков с момента формирования на участке 1 отпора разрушенными породами отмечает снижение горного давления, действующего на междукамерные целики. На конец процесса сдвижения значение степени нагружения ближайшего к участку 1 целика (Ц1) снижается до 0.25.



**Рис. 3.** Распределение вертикальной нагрузки по мере затухания процесса сдвижения:  
1 – на момент достижения 80% от конечных оседаний; 2 – на конец процесса сдвижения

**Таблица 1**

	Ц15	Ц14	Ц13	Ц12	Ц11	...	Ц5	Ц4	Ц3	Ц2	Ц1	
<b>1</b>	0.380	0.385	0.392	0.399	0.407		0.516	0.550	0.607	0.698	0.797	<b>С</b>
	15.4	15.6	15.9	16.2	16.5	...	20.9	22.3	24.6	28.3	32.3	<b>P, МПа</b>
<b>2</b>	0.380	0.380	0.380	0.380	0.380		0.373	0.370	0.360	0.346	0.254	<b>С</b>
	15.4	15.4	15.4	15.4	15.4	...	15.1	15	14.6	14	10.3	<b>P, МПа</b>

**Выводы**

Методами математического моделирования выполнен анализ напряженного состояния междукамерных целиков, примыкающих к длительно остановленной границе выработанного пространства. Получена оценка изменения их степени нагружения по мере развития процесса сдвижения с учетом формирования отпора разрушенных пород на ранее отработанном участке. Анализ результатов расчетов показал, что для целиков, расположенных в пределах 90 м от длительно остановленной границы горных работ, когда оседания достигают 80% от конечных, усредненная нагрузка составляет 21.9 МПа, а степень нагружения – 0.54. При этом вследствие начала действия отпора разрушенными породами в течение затухания процесса сдвижения отмечается снижение горного давления, действующего на междукамерные целики, в среднем до значений, соответствующих условиям полной подработки.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Указания по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей: утв. ПАО «Уралкалий», ЗАО «Верхнекамская калийная компания», ООО «ЕвроХим-Усольский Калийный комбинат». – введ. в действие 30.03.2017 в ред. 2014 г. – Пермь; Березники, 2014. – 130 с.
2. Воробьев А.Н., Прутков С.Н. Метод расчета пролета камер, барьерных и междукамерных целиков на основе теории арочных систем // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2006. – № 10. – С. 201-205.
3. Глебова П.А. Влияние барьерных целиков на степень нагружения элементов камерной системы разработки // Горное Эхо. – 2020. – №1 (78). – С. 31-36. – DOI:10.7242/echo.2020.1.7.

4. Глебова П.А. Оценка степени нагружения междукамерных целиков на границе выработанного пространства // Горное Эхо. – 2021. – №4 (85). – С. 21-24. DOI:10.7242/echo.2021.4.4.
5. Serata S., Milnor S.W. Geomechanics of bedded salt / University of California, Lawrence Livermore Laboratory. – 1979. – R. 184.
6. Tournaire M. Des dimensions a donner aux pilliers des carriers et des Pressions auxquelles les terrains sont soumis dans les profondeurs // Annales des mine. – Paris, 1884. – V. 5. – P. 415-429
7. Шевяков Л.Д. О расчете прочных размеров и деформаций целиков // Изв. АН СССР, Отд. техн. наук. – 1941. – № 7-9. – С.
8. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с.: ил.
9. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 221 с.: ил.
10. Барях А.А., Самоделкина Н.А. Об одном подходе к реологическому анализу геомеханических процессов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2005. – № 6. – С. 32-41. – DOI: 10.1007/s10913-006-0015-x.

УДК 622.83

DOI:10.7242/echo.2022.4.6

## НАСТРОЙКА ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОДРАБОТАННОЙ ТОЛЩИ С УЧЕТОМ ДАННЫХ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Е.А. Губанова, П.А. Глебова  
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

**Аннотация:** Рассмотрено моделирование текущей геомеханической ситуации на основе данных наблюдений за смещением земной поверхности, полученных методами радарной интерферометрии. Процесс деформирования подработанной толщи проведен в упругопластической постановке для условий плоского деформированного состояния (ПДС) с использованием метода конечных элементов. С использованием критериев Кулона-Мора и предельных растягивающих напряжений выполнена итоговая критериальная оценка потенциальной возможности формирования в водозащитной толще (ВЗТ) трещин субвертикальной ориентации на примере района отработки в северной части Тюбегатанского месторождения калийных солей.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, водозащитная толща, субвертикальная нарушенность, мулда сдвижения, площадной мониторинг.

### Введение

Вопросы безопасной эксплуатации рудников имеют первоочередное значение при их разработке. Одним из важных аспектов при этом является площадной контроль оседаний земной поверхности, который преимущественно осуществляется методами радарной интерферометрии. Применению этих методов на месторождениях калийных солей посвящены работы [1-3]. Цель настоящей статьи состояла в моделировании текущей геомеханической ситуации на основе данных радарной интерферометрии при оценке смещений земной поверхности на примере участка отработки в северной части Тюбегатанского месторождения калийных солей. Здесь, ввиду неудовлетворительного состояния выработок промышленного пласта Нижний II, складывается неблагоприятная геомеханическая ситуация, связанная с опасностью формирования в интервале ВЗТ зон техногенной трещиноватости. Данные наблюдений за смещением земной поверхности на данном участке получены с использованием радарных снимков спутника Сентинель-1А. Ввиду того, что техногенные объекты достаточно устойчиво отражают радарный сигнал, такие оценки полей смещений, связанных с подземными работами, позволяют отслеживать смещения амплитудой в несколько сантиметров. По результатам площадного